

УДК 624.131.4

О ЯВЛЕНИИ АНОМАЛЬНО НИЗКИХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН СОВРЕМЕННЫХ БАЗАЛЬТОИДОВ

© 2018 В.М. Ладыгин, Ю.В. Фролова, Э.М. Спиридонов

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Геологический факультет, Москва, 119991; e-mail: ju_frolova@mail.ru*

Особенностью голоценовых эффузивных пород основного-среднего состава являются аномально низкие величины скоростей продольных волн, характерные даже для плотных разностей. Для объяснения данного явления проведена серия экспериментов по насыщению образцов люминофором, с последующим изучением структуры порового-трещинного пространства на флуоресцентном микроскопе. Установлено, что основной причиной низких скоростей Р-волн является сеть тончайших микротрещин, которые возникают в эффузивных породах в процессе остывания и кристаллизации магматического расплава.

Ключевые слова: базальтоиды, скорости продольных волн, микротрещиноватость, микропористость, возраст.

ВВЕДЕНИЕ

В 1980 г. при изучении свойств эффузивных пород Авачинского и Мутновского вулканов (полуостров Камчатка, Россия) (рис. 1, табл. 1) было обнаружено, что они значительно различаются по скоростям продольных волн (V_p), хотя их плотность и пористость близки (Ладыгин, Никитин, 1980). Был также отмечен тот факт, что большинство эффузивов Авачинского вулкана обладают пониженными значениями V_p даже при высокой плотности (низкой пористости). Это наглядно иллюстрируют наши последующие исследования этих вулканов (рис. 2, 3). Возник вопрос — что могло повлиять на заметное уменьшение скорости упругих волн у базальтов Авачинского вулкана?

Известно, что на величину V_p влияют различные факторы, среди которых вещественный состав горных пород, их плотность, пористость, структура, трещиноватость.

По химическому составу вулканы Мутновского и Авачинского вулканов близки — все они представлены базальтами и андезибазальтами. По минеральному составу они также достаточно близки, при несколько повышенном содержании пироксенов в базальтах Мутновского вулкана, и соответственно, более высокой плотности твердых частиц (табл. 2). Структуры цементиру-

ющей массы сравниваемых пород идентичны — преобладают интерсертиальная и микролитовая (рис. 4), гораздо более редка гиалопилитовая. Главное различие — их возраст. Возраст изученных эффузивов Мутновского вулкана средне-позднеплейстоценовый, Авачинского вулкана — голоценовый (Действующие ..., 1991).

Было высказано предположение (Ладыгин, Никитин, 1980), что при превращении магматического расплава в эффузивные горные породы из-за сокращения объема до 10–15 % возникают тончайшие микротрещины и микропоры, которые и являются причиной аномально низких значений скоростей V_p . Очевидно, что остывание в разных частях лавовых потоков происходит неравномерно, в результате чего количество и распределение микротрещин и микропор неодинаково, из-за чего снижение величин V_p может быть различно.

В литературе встречаются отдельные сведения о явлении аномально низких скоростей продольных волн молодых базальтов. В частности, в работе (Sigurdsson et al., 2000) отмечается, что низкие скорости продольных волн характерны для голоценовых и верхнеплейстоценовых оливин-толеитовых базальтов Исландии. Так, у пород с плотностью 2.6–2.7 г/см³ и пористостью 11–14%, значения V_p составляют всего 2.2–2.7 км/с. Данное явление исландские ученые объясняют

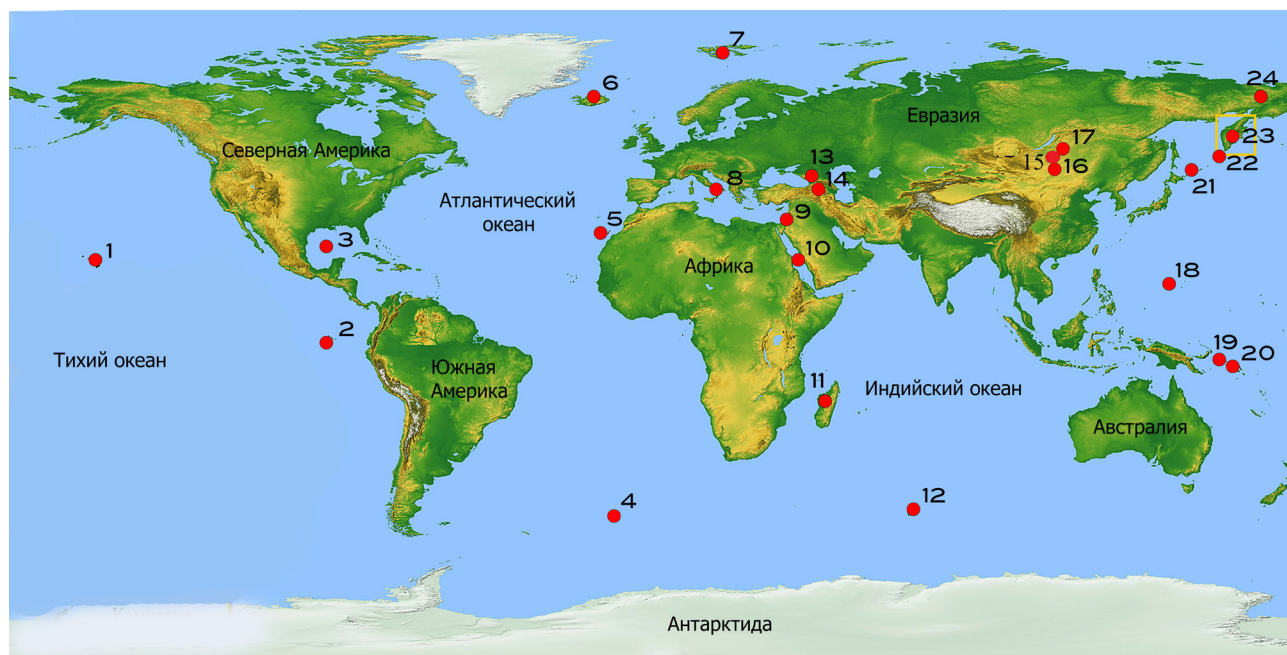


Рис. 1. Схема точек отбора образцов эффузивных пород.

наличием межкристаллических капиллярных пор, наблюдаемых во флуоресцентном микроскопе. Интересно, что эти же породы характеризуются повышенной проницаемостью.

Итальянские исследователи зафиксировали низкие значения V_p у современных базальтов вулкана Этны (Pappalardo et al., 2017; Vinciguerra et al., 2005). При плотности $\rho = 2.67\text{--}2.82 \text{ г/см}^3$ и пористости $n = 2\text{--}6\%$, значения скорости продольных волн варьируют в интервале $2.55\text{--}3.48 \text{ км/с}$ (среднее значение $V_p = 3.0 \text{ км/с}$). Данное явление ученые связывают с наличием микротрещин в основной массе и в фенокристаллах базальтов, которые они наблюдали с помощью растрового электронного микроскопа. По мнению ученых, образование микротрещин вызвано термическими напряжениями, возникающими при остывании лавы. Испытания образцов под давлением (до 80 МПа) приводят к повышению значений V_p на $45\text{--}60\%$ за счет закрытия микротрещин (Vinciguerra et al., 2005).

С течением времени (по нашим данным, от нескольких десятков до сотен тысяч лет) значения V_p базальтовых пород становятся «нормальными», то есть значительно увеличиваются при практически неизменных значениях пористости и отсутствии каких-либо вторичных изменений в породах. Вероятно, это вызвано смыканием стенок микротрещин за счет эффекта релаксации. Время релаксации и увеличения значений V_p в разных регионах может быть различно. Так же оно может быть различно для эффузивов из разных частей одного лавового потока.

На смыкание микротрещин с течением времени, правда, в металлах, указывают ученые

Массачусетского технологического института (http://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/neozhidanno_treshhiny_v_metalle_mogut_zatyagivatsya). Согласно их исследованиям, металл, при определенных условиях, может «исцелять» себя, затягивая трещины (явление дисклинации). Ученые полагают, что причиной этого явления является миграция границ микrokристаллических зерен при определенных условиях.

Выявленное явление низких значений скоростей продольных волн у плотных эффузивных пород не соответствует положению геофизики о том, что чем больше плотность породы, тем выше величина скорости упругих волн. Возник вопрос — насколько это явление широко распространено или это — лишь частные случаи?

В связи с этим, были проведены целенаправленные эксперименты по изучению скорости продольных волн базальтоидов различных регионов Земли для возможности визуальной фиксации наличия микротрещиноватости в эффузивах.

Исследования растянулись на многие годы. Потребовались сбор коллекций разновозрастных эффузивов с достаточно точной датировкой возраста, разработка методики исследований, поиск оборудования.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В течение многих лет собиралась коллекция базальтов и близких по составу эффузивных пород из различных регионов Земли (рис. 1). В коллекции представлены образцы пород, собранные авторами во время полевых работ на Камчатке и Курильских островах (Россия),

Таблица 1. Каталог исследованных образцов

№*	Регион	Район, вулкан	Породы, возраст	Коллеги, предоставившие образцы
1	Гавайские острова		Четвертичные базальты из скважин глубиной до 3500 м	В.Б. Курносов (ГИН РАН)
2	Дно впадины Хесса (Тихий океан)		Четвертичные базальты	Г.Л. Кашинцев (ИО РАН)
3	Дно Мексиканского залива		Четвертичные базальты из скважин №№ 55, 59, 60, 125	В.Б. Курносов (ГИН РАН)
4	Район острова Буве (Атлантический океан)		Четвертичные базальты	А.А. Булычев и Д.А. Гилад (МГУ)
5	Канарские острова	Остров Ла Пальма, вулкан Кумбре-Вьеха	Базальты извержений 1 Ма, 0.6 Ма, 1646 г., 1712 г.	А.Б. Белоусов (ИВиС ДВО РАН)
6	Исландия		Четвертичные базальты	А.Р. Гептнер (ГИН РАН), Ю.В. Фролова (МГУ)
7	Архипелаг Шпицберген	Вулканы Сверре, Халвдан и Сигурд	Раннечетвертичные (> 1 Ма) базальты	Ю.С. Геншафт и А.Я. Салтыковский (ИФЗ РАН)
8	Италия	Вулканы Этна и Везувий	Голоценовые базальты	В.М. Округин, (ИВиС ДВО РАН), В.А. Королев, Ю.В. Фролова (МГУ)
9	Израиль	Истоки р. Иордан, район г. Вет-Шаа	Четвертичные базальты	О.Л. Зеленцова, А.В. Ладыгин
10	Дно Красного моря		Голоценовые и средне-четвертичные базальты	Г.Л. Кашинцев (ИО РАН)
11	Остров Мадагаскар		Четвертичные базальты	В.А. Рашидов (ИВиС ДВО РАН)
12	Южные Сандвичевы острова	Остров Беллинсгаузена	Четвертичные базальты	О.А. Луканин (ГЕОХИ РАН)
13	Грузия	Эльбрус	Среднечетвертичные базальты (до 0.2 Ма)	В.В. Ярмолюк (ИГЕМ РАН)
14	Армения	Лорийское плато	Неоген-четвертичные базальты и андезитобазальты	В.М. Ладыгин (МГУ)
15	Восточные Саяны	Окский район, долина р. Жомболок	Средне- и позднечетвертичные базальты	П.Ю. Плечов (МГУ)
16	Монголия		Четвертичные базальты	Ю.С. Геншафт и А.Я. Салтыковский (ИФЗ РАН)
17	Восточные Саяны	Окский район	Раннечетвертичные базальты	В.М. Ладыгин (МГУ)
18	Дно Тихого океана у Марианской дуги		Четвертичные базальты	В.М. Округин и В.А. Рашидов (ИВиС ДВО РАН)
19	Соломоновы острова	Подводный вулкан Ковачи	Базальты извержения 1968–1976 г.	В.М. Округин и В.А. Рашидов (ИВиС ДВО РАН)
20	Соломоновы острова	Подводный вулкан Симбо	Четвертичные базальты	В.М. Округин и В.А. Рашидов (ИВиС ДВО РАН)

Таблица 1. Окончание

21	Курильские острова	Остров Итуруп, вулкан Баранского	Четвертичные базальты и андезибазальты	В.М. Ладыгин и Ю.В. Фролова (МГУ)
22	Курильские острова	Остров Парамушир	Четвертичные базальты и андезибазальты	С.Н. Рычагов (ИВиС ДВО РАН), Т.И. Фролова и И.А. Бурикова (МГУ)
23	Полуостров Камчатка	Озерновское плато	Поздненеогеновые (6 Ма) базальты	Т.Г. Чурикова, Б.Н. Гордейчик (ИВиС ДВО РАН)
		Вулкан Шивелуч	Голоценовые андезиты	В.М.Ладыгин (МГУ)
		Вулкан Ключевская Сопка	Голоценовые базальты	В.М. Ладыгин (МГУ)
		Вулкан Безымянный	Голоценовые базальты, андезибазальты и андезиты	В.М. Ладыгин (МГУ) В.М. Округин, О.А. Гирина (ИВиС ДВО РАН)
		Вулкан Толбачик, БТТИ	Голоценовые базальты	В.М. Ладыгин (МГУ) А.П. Максимов и С.А. Хабуная (ИВиС ДВО РАН)
		Срединный хребет. Серия мелких конусов в районе реки Быстрой (пос. Эссо)	Голоценовые базальты	В.М. Ладыгин (МГУ)
		Вулкан Карымский	Среднечетвертичные и голоценовые базальты и андезибазальты	В.М. Ладыгин (МГУ)
		Вулкан Авачинский	Позднечетвертичные и голоценовые андезибазальты и базальты	Б.Н. Мельников (ИФЗ РАН), В.М. Ладыгин (МГУ)
		Вулканы Мутновский и Жировской	Раннечетвертичные и голоценовые андезибазальты и базальты	Б.Н. Мельников (ИФЗ РАН), В.М. Ладыгин (МГУ)
		Вулкан Ксудач	Среднечетвертичные и голоценовые андезибазальты	Т.И. Фролова и И.А. Бурикова (МГУ)
		Вулкан Камбальный	Раннечетвертичные и голоценовые андезибазальты	В.М. Ладыгин и Ю.В. Фролова (МГУ), С.Н. Рычагов (ИВиС ДВО РАН)
24	Чукотка	Аньюйский вулкан	Базальты (до 0.2 Ма)	Ф.А. Романенко, (Географический факультет МГУ)

Примечание. Номер в таблице соответствует цифре на схеме точек отбора образцов эффузивных пород (рис.1)

на Кавказе (Армения, Грузия), в Исландии и Италии. Многочисленные образцы из «региональных» коллекций любезно предоставили наши коллеги, которым мы выражаем глубокую благодарность (табл. 1). Данная коллекция легла в основу изучения особенностей скоростей продольных волн в базальтоидах.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для лабораторных исследований из каждого образца были приготовлены цилиндры или

прямоугольные призмы (от 1 до 6 штук в зависимости от объема образца). Для каждого образца определялись плотность (ρ), плотность твердых частиц (ρ_s), пористость общая (n) и открытая (n_o), водопоглощение (W_p). Скорости распространения продольных волн (V_p) определялись по стандартной методике ультразвукового просвечивания в соответствии с (ГОСТ 21153.7-75, 1984) в сухом и водонасыщенном состоянии на приборе «УЛЬТРАЗВУК».

Петрографические исследования проводились с помощью оптических микроскопов

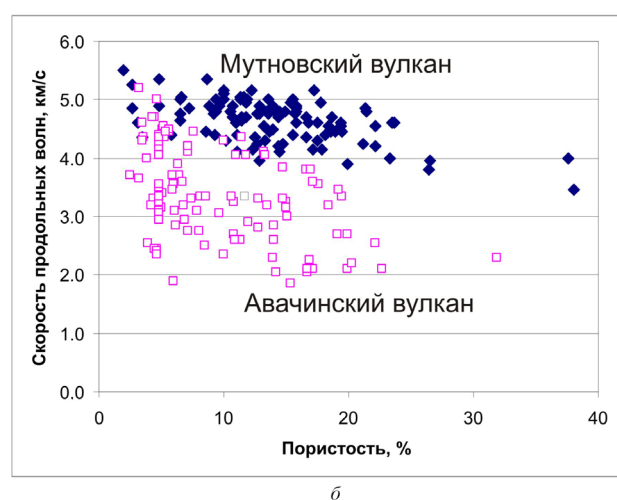
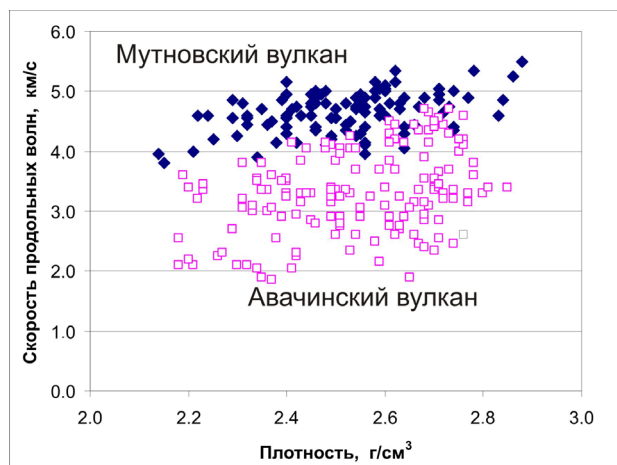


Рис. 2. Зависимость скорости продольных волн эффузивных пород от плотности (а) и пористости (б). Ромбы — эффузивы Мутновского вулкана, квадраты — Авачинского вулкана (образцы из коллекций Б.Н. Мельникова и В.М. Ладыгина).

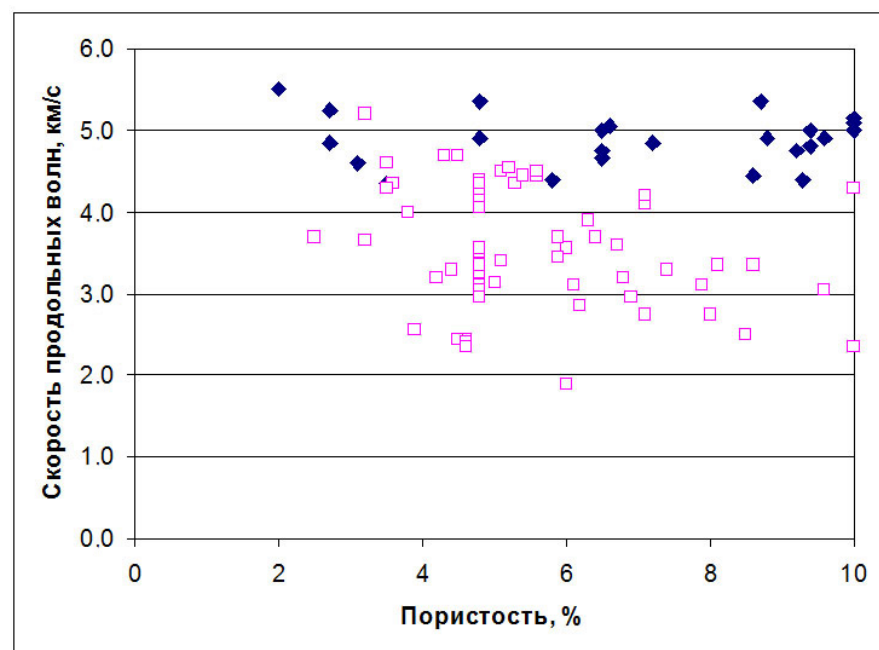


Рис. 3. Зависимость скорости продольных волн в базальтах от их пористости (для образцов с массивной текстурой и плотностью выше 2.6 г/см³). Ромбы — базальты Мутновского вулкана, квадраты — Авачинского вулкана.

(Olympus BX-41 и ПОЛАМ Л-211). Изучение микротрещиноватости пород производилось на микроскопе Olympus BX-41 в отраженном и флуоресцентном свете. В качестве люминофора использовался солидол. Подготовка образца происходила следующим образом. Ровная поверхность образца покрывалась слоем солидола, и далее образец насыщался в течение недели. Было видно, как солидол постепенно проникает внутрь образца; через неделю глубина проникновения обычно достигала 1.5–2 см (рис. 5). Затем, чтобы убрать непосредственное влияние солидола, образец разрезался пополам по вертикали. Получаемые поверхности шлифовали, полировали и затем наблюдали и фотографировали под микроскопом в отраженном и флуоресцентном свете.

Следует отметить, что для некоторых пород, в частности, вулканических туфов, провести такие исследования не удалось, так как проникновение солидола не происходило, несмотря на высокую пористость пород.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

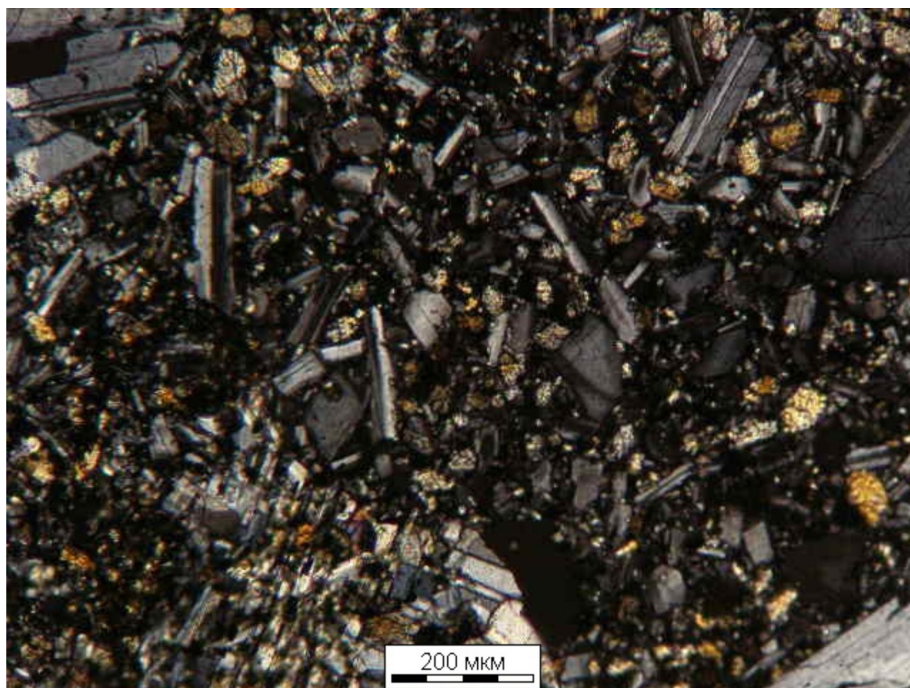
К настоящему времени, на основе изучения большой коллекции образцов, получено достаточное количество фактов, позволяющих утверждать, что аномально низкие значения V_p являются явлением, характерным только для молодых — голоценовых и частично верхнеплейстоценовых базальтоидов различных регионов Земли.

В частности, исследования современных эффузивных пород Камчатки (вулканы Ключевской, Толбачик, Безымянный, Карымский) подтвердили наши выводы, сделанные по Мутновскому и Авачинскому вулканам

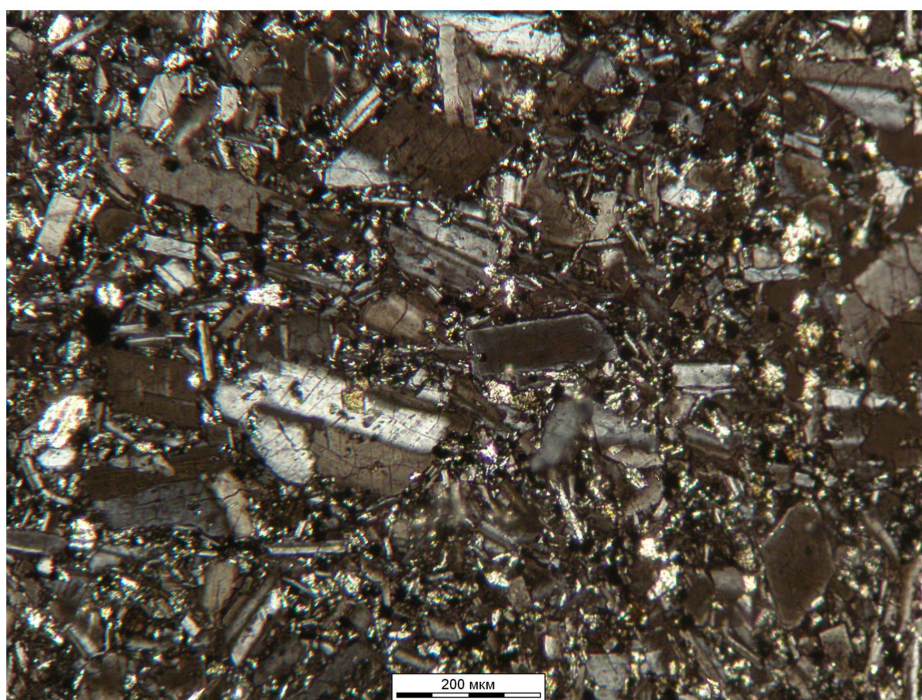
О ЯВЛЕНИИ АНОМАЛЬНО НИЗКИХ ЗНАЧЕНИЙ

Таблица 2. Сравнительная характеристика физических свойств базальтоидов Мутновского и Авачинского вулканов (полуостров Камчатка, Россия)

Вулкан	Плотность, г/см ³	Плотность твердых частиц, г/см ³	Пористость, %	Интервал изменения V_p , км/с	Среднее значение V_p , км/с	Кол-во обр.
Авачинский	2.69	2.84	5.3	2.35-5.70	3.55	182
Мутновский	2.69	2.91	7.6	3.85-5.5	5.35	108



a



б

Рис. 4. Фотографии шлифов, николи скрещены: *a* — базальт Мутновского вулкана, $\rho = 2.71$ г/см³, $V_p = 5.05$ км/с; *б* — базальт Авачинского вулкана, $\rho = 2.80$ г/см³, $V_p = 3.3$ км/с.

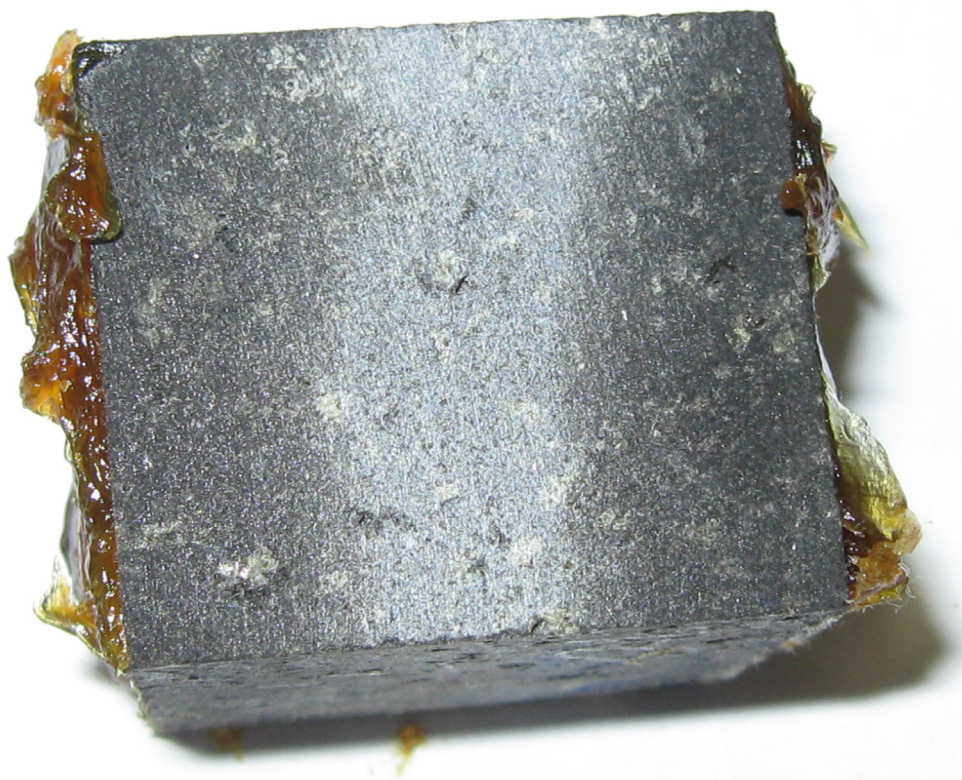


Рис. 5. Образец базальта насыщенный с двух сторон солидолом. Длина ребра 4 см.

(Ладыгин, Никитин, 1980). Можно видеть, что средние значения V_p для массивных разностей базальтов, с плотностью более 2.6 г/см^3 , составляют всего 3–4 км/с. Аналогичные результаты для голоценовых базальтоидов были получены и по другим районам мира (табл. 3). Следует отметить, что количество исследованных образцов из этих регионов значительно больше, но мы, как уже указано, рассматриваем только образцы с массивной текстурой с плотностью более 2.6 г/см^3 . Все современные эффузивы, даже при высокой плотности, имеют низкие величины скоростей V_p (табл. 3).

Далее возник вопрос — какие величины скоростей продольных волн V_p характерны для более древних эффузивов при такой же плотности (и соответственно небольших величинах пористости)? Для сравнения были выбраны раннеплейстоценовые базальтоиды Камчатки, Армении и Шпицбергена (табл. 3). Все они неизменные, не подверглись никаким вторичным изменениям, не содержат новообразований. В выборку были отобраны только массивные образцы с плотностью более 2.6 г/см^3 . Значения V_p раннеплейстоценовых базальтоидов оказались существенно выше ($> 4 \text{ км/с}$), чем у их молодых аналогов.

Картина взаимосвязи плотности и скорости упругих волн различна для голоценовых и раннеплейстоценовых пород, что отчетливо показано на диаграммах (рис. 6). Для голоце-

новых эффузивов корреляционная связь между плотностью и V_p отсутствует (рис. 6а). Это просто большой массив данных (облако) с интервалом значений $V_p = 1.8\text{--}5.0 \text{ км/с}$, при плотности $1.5\text{--}3.0 \text{ г/см}^3$. Между тем, для раннеплейстоценовых пород прослеживается вполне определенная прямо пропорциональная зависимость этих параметров (рис. 6б). Кроме того, у голоценовых эффузивов преобладают значения $V_p = 2\text{--}4 \text{ км/с}$, у раннеплейстоценовых они существенно выше ($V_p = 4\text{--}6 \text{ км/с}$).

На примере образцов с точной датировкой было рассмотрено изменение величины V_p базальтов с течением времени (табл. 4). В целом, для всех рассматриваемых регионов, отмечается четкая тенденция к повышению значений V_p пород с увеличением их возраста. Нельзя не отметить, что встречаются отдельные образцы эффузивов в районах современного вулканизма, имеющие высокие значения V_p , в пределах $4.5\text{--}5.0 \text{ км/с}$. В частности, такие образцы есть среди пород Авачинского вулкана (рис. 2). Однако это не искажает общую картину, а скорее наводит на мысль, что количество и морфология микротрещин и микропор тесно связаны с условиями застывания жидкого лавового потока, что неизбежно приводит к разбросу значений V_p , так как застывает поток крайне неравномерно — в верхней части очень быстро, в течение минут, часов, а в центральной и нижней — медленнее — в течение дней, месяцев.

Таблица 3. Плотность и скорость продольных волн (V_p) базальтоидов различных регионов мира

Район		Кол-во обр.	Интервал изменения плотности, г/см ³	Средние зна- чения плот- ности, г/см ³	Интервал изменения V_p , км/с	Средние значения V_p , км/с
Голоценовые базальтоиды (Q_4)						
Камчатка	Толбачик, Север- ный прорыв 1975 г.	20	2.64–2.84	2.73	3.45–4.80	4.05
	Толбачик, шлаковые конуса (Бубочка, Каменистая, Высокая, 1004 м, 1941 г.)	29	2.60–2.78	2.65	2.40–4.25	3.15
	Плоский Толбачик	6	2.62–2.69	2.65	2.90–3.65	3.15
	Ключевской	89	2.60–2.84	2.69	2.20–4.30	3.0
	Безымянный, лаво- вые потоки	26	2.60–2.78	2.66	2.20–4.80	3.15
Подводные вулканы Симбо и Ковачи (Соломоновы Острова)		10	2.60–2.88	2.71	2.20–4.25	3.05
Канарские острова, лавовые потоки 1646 г., 1712 г. (Испания)		2	2.72–2.87	2.79	3.50–3.90	3.70
Исландия		44	2.62–3.02	2.79	1.70–4.70	3.75
Вулкан Этна (Италия)		6	2.60–2.76	2.67	3.20–3.95	3.65
Раннеплейстоценовые базальтоиды (Q_1)						
Кавказ (Армения)		272	2.60–2.9	2.72	4.10–6.20	5.10
Камчатка. Озернов- ский район (Россия)		38	2.60–2.81	2.72	4.0–5.75	4.80
Камчатка. Жировской вулкан (Россия)		48	2.61–2.86	2.70	4.60–5.80	5.0
Архипелаг Шпицберген		120	2.60–2.96	2.70	4.80–6.10	5.10

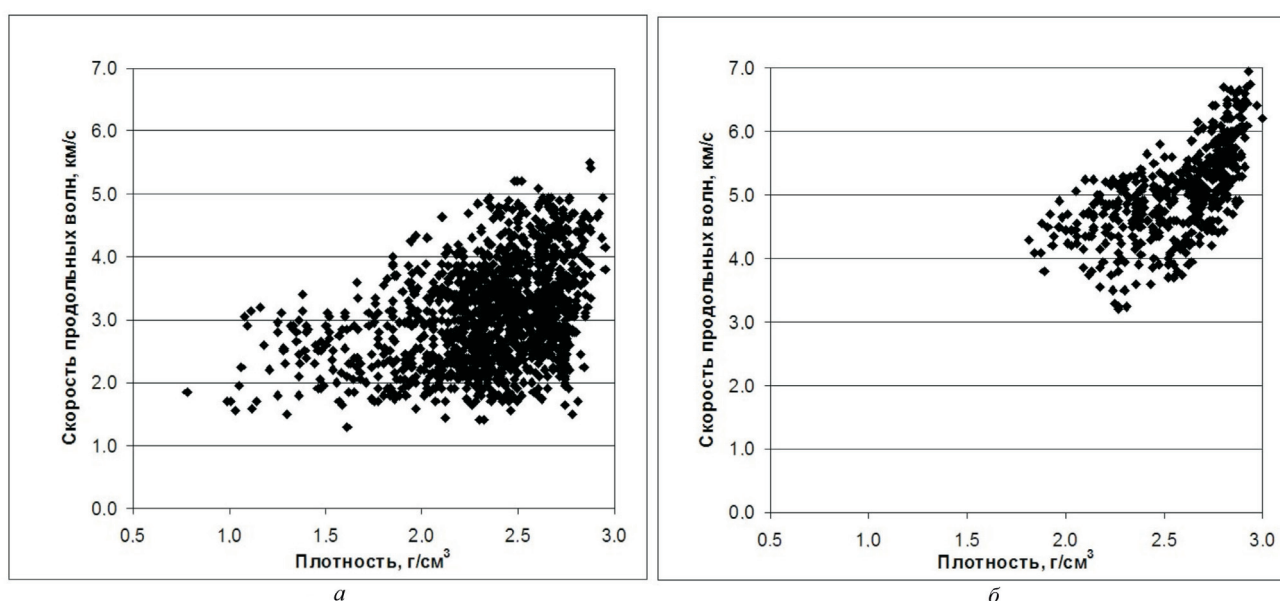
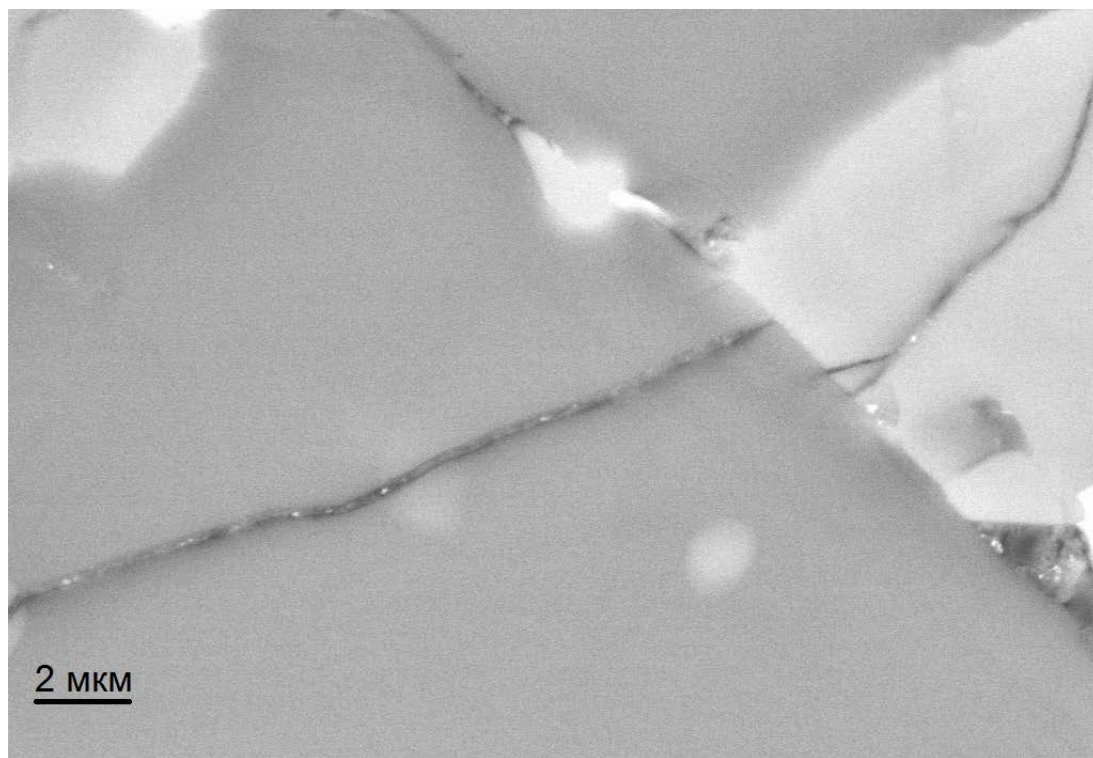


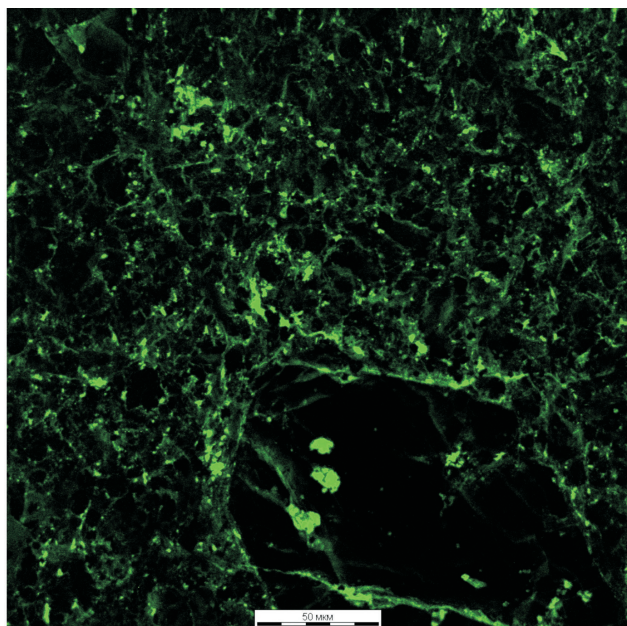
Рис. 6. Зависимость скорости продольных волн у базальтов от их плотности: а — базальты голоценовые; б — раннеплейстоценовые. Количество определений — 1420.

Таблица 4. Изменение скорости продольных волн (V_p) базальтоидов в зависимости от возраста для различных регионов мира

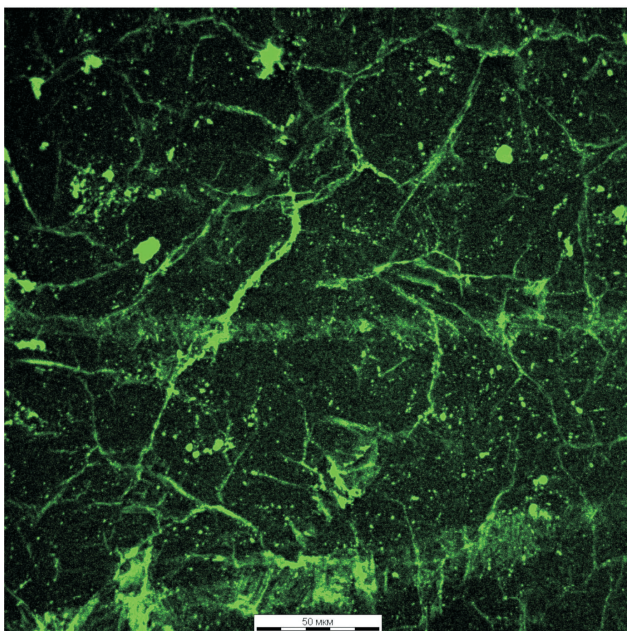
Возраст, тыс. лет	Плотность, г/см ³	Плотность твёрдых частиц, г/см ³	Пористость, %	Скорость продольных волн (V_p), км/с	Скорость продольных волн в водонасыщен- ном состоянии (V_{pv}), км/с
Тувинская республика (Россия)					
10	2.76	2.91	5.2	4.25	5.15
250	2.73	2.93	6.8	4.15	5.10
300	2.72	2.72	0.1	4.40	5.35
360	2.77	2.94	5.8	5.05	5.30
400	2.73	2.97	8.1	5.10	5.40
Канарские острова (Испания)					
1712 г.	2.87	2.99	4.0	3.45	4.90
1646 г.	2.72	3.0	9.3	3.80	5.05
600	2.66	2.95	9.8	5.30	5.50
1000	3.10	3.12	0.6	6.55	6.70
Вулкан Везувий (Италия)					
1872 г.	2.47	2.78	11.2	2.95	3.55
Кавказ (Грузия)					
100	2.53	-	5.9	3.65	5.05
200	2.47	-	9.5	4.55	5.35
420	2.62	-	5.8	4.15	5.30

Примечание. V_p — скорость продольных волн в воздушносухом состоянии; V_{pv} — скорость продольных волн в водонасыщенном состоянии.

**Рис. 7.** Микротрещины в базальтах океанского дна района острова Буве (Атлантический океан). Фотография в режиме электронного микроскопа.



а



б

Рис. 8. Микротрещиноватость в базальтах вулкана Кумбре-Вьеха извержения 1646 г. (остров Ла Пальма, Канарские острова). Фотографии во флуоресцентном свете: а, б — различные участки одного образца.

Таким образом, было доказано, что аномально низкие величины скорости продольных волн характерны для большинства голоценовых эффузивов.

Дальнейшей задачей, стоящей перед нами, являлись поиск и визуализация микропор и микротрещин, которые по нашим представлениям и вызывают уменьшение величин скоростей упругих волн.

Что такое микротрещины? По классификации Е.М. Сергеева (Грунтоведение, 1983)

к микротрещинам относят трещины, невидимые невооруженным взглядом. Их раскрытость измеряется десятками и сотнями долями микрон. Верхний предел раскрытости микротрещин условно принят равным 0.1 мм (100 микрон). Ранее, исследуя образцы эффузивов под электронным микроскопом, мы наблюдали эти микротрещины в кристаллах (рис. 7), но никак не связывали их со свойствами.

В настоящее время мы проводим целенаправленный поиск микротрещин в базальтоидах и увязываем их со свойствами пород, в частности, со скоростями упругих волн. Была проведена серия экспериментов по определению скорости продольных волн эффузивных пород голоценового и плейстоценового возраста и изучению структуры их порово-трещинного пространства с помощью флуоресцентного микроскопа. Во флуоресцентном свете при больших увеличениях ($\times 500$) хорошо просматривалась сеть микротрещин (рис. 8). Установлено, что в объеме пород микротрещины распределены неравномерно и хаотично. Какой-либо приуроченности к определенным участкам (границы между кристаллами, отдельные минералы, вулканическое стекло) не наблюдается. Раскрытость микротрещин оценивается в десятые доли микрона, длина колеблется от 10 микрон до нескольких мм (рис. 9). Помимо микротрещин, видны многочисленные тончайшие поры, также образовавшиеся при затверждении магматического расплава.

Интенсивная микротрещиноватость характерна для голоценовых эффузивов, тогда как в плейстоценовых породах такие микротрещины встречаются значительно реже или вовсе отсутствуют. Очевидно, со временем значительная часть микротрещин затягивается. Эта закономерность хорошо согласуется с данными по скоростям продольных волн, что подтвердило наше предположение о том, что микротрещиноватость является главной причиной аномально низких значений V_p .

ВЫВОДЫ

При изучении представительной коллекции эффузивных пород различных регионов Земли обнаружено и доказано, что важной особенностью большинства голоценовых базальтов и андезитобазальтов являются аномально низкие величины скоростей продольных волн ($V_p = 2-4$ км/с).

Установлено, что причиной низких скоростей Р-волн является сеть тончайших микротрещин, формирующаяся в эффузивах в процессе остывания и кристаллизации магматического расплава.

С течением времени (первые сотни тысяч лет) за счет смыкания микротрещин и релаксации

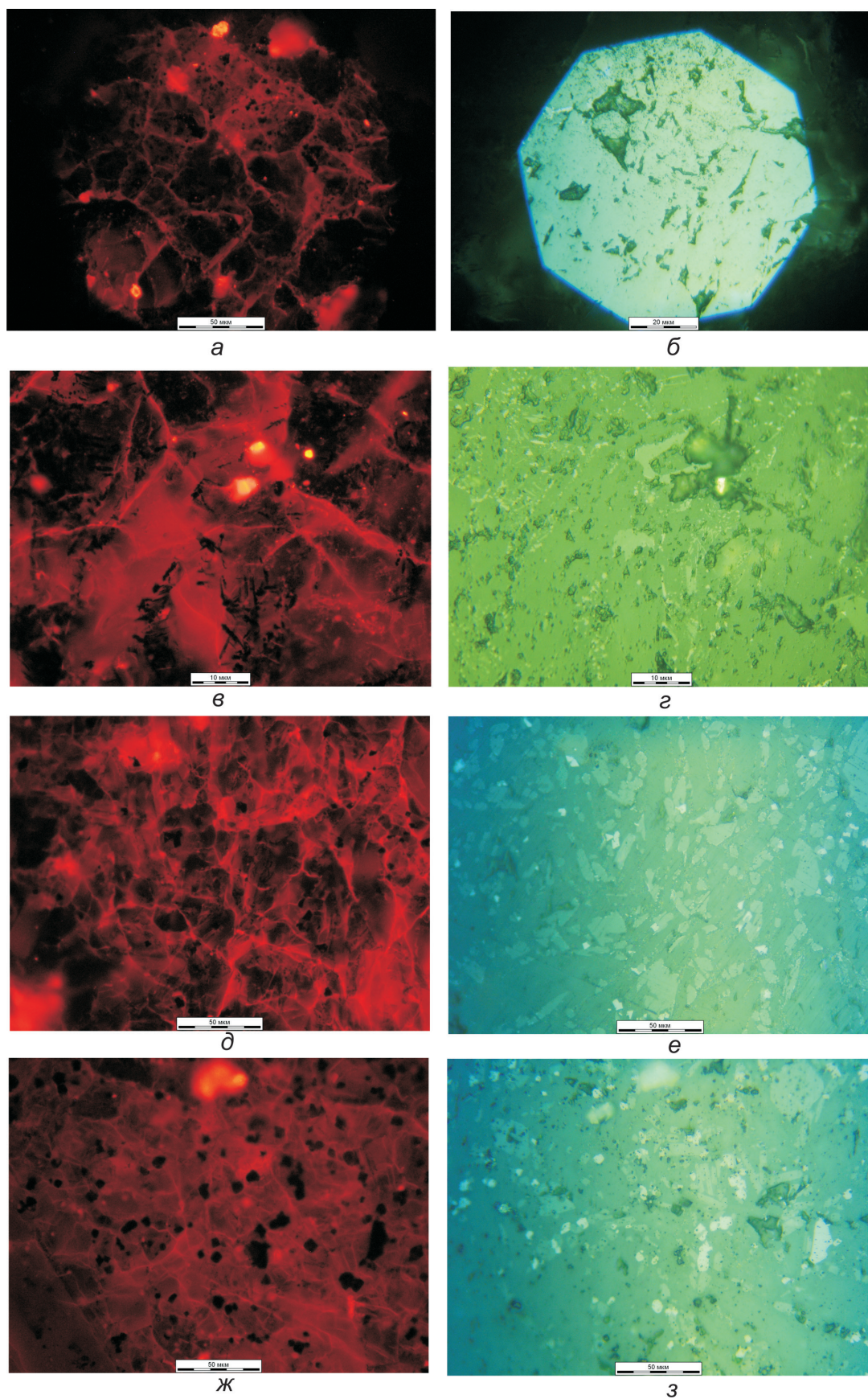


Рис. 9. Микротрещиноватость в голоценовых базальтах. Фотографии во флуоресцентном (слева) и в отраженном свете (справа). Вулкан Ключевской, прорыв Пийпа 1966 г. (Камчатка) $\rho = 2.67 \text{ г/см}^3$, $V_p = 2.8 \text{ км/с}$ (а, б); республика Тыва $\rho = 2.76 \text{ г/см}^3$, $V_p = 4.25 \text{ км/с}$ (в, г); вулкан Ключевской, купол «Булочка» (Камчатка) $\rho = 2.6 \text{ г/см}^3$, $V_p = 2.4 \text{ км/с}$ (д, е); вулкан Этна (Италия) $\rho = 2.6 \text{ г/см}^3$, $V_p = 2.4 \text{ км/с}$ (ж, з).

напряжений, взаимодействия атомов, находящихся на границах микротрещин и восстановления кристаллической структуры минералов, происходит заметное увеличение величины V_p эффузивной породы. Время увеличения V_p до «нормальных» значений в разных регионах может быть различно. Так же оно может быть различно для эффузивов из разных частей лавового потока.

Картина взаимосвязи между плотностью и скоростью упругих волн различна для голоценовых и раннеплейстоценовых пород: у первых она практически отсутствует, тогда, как у вторых прослеживается вполне определенная прямо пропорциональная зависимость.

Обнаруженный феномен низких скоростей продольных волн молодых базальтоидов, по нашему мнению, может быть использован как косвенный метод определения возраста вулканических пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00501-а).

Список литературы

ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. М.: Изд-во стандартов, 1984. 35 с.

Грунтоведение. 5-е издание / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: МГУ, 1983. 392 с.

Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. 416 с.

Ладыгин В.М., Никитин В.Н. О некоторых особенностях свойств молодых эффузивов Камчатки // Вестник Московского Университета. Сер. 4. Геология. 1980. № 5. С. 81–86.

Ладыгин В.М., Фролова Ю.В., Соколов В.Н. и др. Возраст, скорость упругих волн и микротрещиноватость эффузивов // Тез. докл. научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция Геология. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва. 17–25 апреля 2007. <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1178466&uri=ladygin.html>

Pappalardo G., Punturo R., Mineo S., Contrafatto L. The role of porosity on the engineering geological properties of 1669 lavas from Mount Etna // Engineering Geology. 2017. V. 221. P. 16–28.

Sigurdsson O., Gudmundsson A., Fridleifsson G.O. et al. Database on igneous rock properties in Icelandic geothermal systems. Status and unexpected results // Proceedings World Geothermal Congress. Kyushu – Tohoku, Japan. 2000. V. 1. P. 2881–2886.

Vinciguerra S., Trovato C., Meredith P.G., Benson P.M. Relating seismic velocities, thermal cracking and permeability in Mt. Etna and Iceland basalts // International Journal of Rock Mechanics & Mining Science. 2005. V. 42. Iss. 7–8. P. 900–910.

ABNORMALLY LOW VELOCITY VALUES OF LONGITUDINAL WAVES IN MODERN BASALTOIDS

V.M. Ladygin, J.V. Frolova, E.M. Spiridonov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, 119991

The paper shows that the abnormally low values of longitudinal wave velocities, typical even for dense differences, are an important feature of Holocene effusive rocks of medium-basic composition. In order to explain this phenomenon, a series of experiments was conducted to saturate the samples with a phosphor followed by a study of the structure of the pore-fractured space on a fluorescent microscope. The experiments showed that low P-wave velocities are caused by the network of the finest microcracks formed in the rock during cooling and crystallization of the magmatic melt.

Keywords: basalts, velocity of longitudinal waves, microcracks, microporosity.